

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-40>

УДК 004

МІЛЬОХІН Максим

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

[m.i.milokhin@student.csn.khai.edu](mailto:m.i.milokhin@student.csn.khai.edu)

## МУЛЬТИ-СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ПРИ РОЗМІНУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЇВ БПЛА

У роботі розглянуто сучасні досягнення в галузі розмінування з використанням роїв БПЛА з мульти-сенсорними платформами. Проведений аналіз ознак існуючих вибухонебезпечних предметів та засобів їх детектування за допомогою електронних сенсорів різних типів, розміщених на борту БПЛА. Досліджено варіанти розміщення сенсорів та планування польотів для пошуків та ідентифікації вибухонебезпечних предметів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, рої БПЛА, розмінування, сенсори, вибухонебезпечні предмети, мультисенсорні платформи.

MILOKHIN Maksym

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

## MULTI-SENSOR TECHNOLOGIES FOR THE DETECTION OF EXPLOSIVE OBJECTS IN MINING USING UAV SWARMS

The problem of contamination of the territory in Ukraine as a result of Russia's aggression with explosive objects (explosive objects), in particular mines, is urgent and critically important for the safety of citizens and the further development of the country. The scale of this problem is defined as "large but unknown", which requires immediate action to reduce the threat and minimize the risks. The motivation for research and development of effective demining strategies is not only the preservation of life and health of residents, but also the creation of a safe environment for the economic and social development of the country. Ensuring the security of infrastructure, land resources and opportunities for free movement of the population are important components of measures in solving this problem. Also, successful demining will contribute to strengthening international cooperation and increasing the prestige of Ukraine on the world stage. In the Report "Overview of mine action 2023" Ukraine was recognized as one of the most polluted countries in the world. According to the classification, the level of contamination was assessed as "unknown but extensive". Nevertheless, thanks to the work with non-mechanized survey, by the end of 2023, the area of potentially contaminated territory of Ukraine has decreased by 18,000 square kilometers. The area of potentially contaminated land is now estimated to be 156,000 square kilometers. The Government of Ukraine anticipates that 5-10% of all potentially contaminated land may require technical survey, and 2-8% may require demining from mines and explosive objects. In the economy, agriculture has become the most affected sector, since many farm fields cannot be used without professional demining, but this requires large amounts of money, equipment, and specialist time. Also, in Ukraine, there is a constant increase in the number of injured civilians from GNP, which should not be the case at all.

The work considers actual achievements in the field of demining using UAVs with multi-sensor platforms. An analysis of the signs of existing explosive objects and means of their detection using electronic sensors of various types placed on board UAVs was carried out. Variants of sensor placement and flight planning for the search and identification of explosive objects were studied.

Keywords: unmanned aerial vehicles, swarms of UAVs, demining, sensors, explosive objects, multi-sensor platforms.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Проблема забруднення території в Україні внаслідок агресії Росії вибухонебезпечними предметами (ВНП), зокрема мінами, є актуальною та критично важливою для безпеки громадян та подальшого розвитку країни. Масштаби цієї проблеми визначаються як "масштабні, але невідомі", що вимагає негайних заходів для зниження загрози та мінімізації ризиків. Мотивацією для дослідження та розробки ефективних стратегій розмінування є не лише збереження життя та здоров'я мешканців, а й створення безпечного середовища для економічного та соціального розвитку країни. Забезпечення безпеки інфраструктури, земельних ресурсів та можливостей для вільного руху населення є важливими складовими мір у вирішенні цієї проблеми. Також, успішне розмінування сприятиме зміцненню міжнародного співробітництва та підвищенню престижу України на світовій арені [1]. У Доповіді "Огляд протимінної діяльності 2023" Україна була визнана однією з найбільш забруднених країн у світі [2]. Згідно з класифікацією, рівень забруднення був оцінений як "невідомий, але масштабний". Тим не менш, завдяки роботі з немеханізованим обстеженням, до кінця 2023 року площа потенційно забрудненої території України зменшилася на 18 000 квадратних кілометрів. Зараз вважається, що площа потенційно забрудненої землі становить 156 000 квадратних кілометрів. Уряд України передбачає, що 5-10% всієї потенційно забрудненої землі може вимагати технічного обстеження, а 2-8% можуть потребувати розмінування від мін і вибухонебезпечних об'єктів. В економіці найбільш постраждалим сектором стало сільське господарство, так як я дуже багато фермерських полів неможливо використовувати без професійного розмінування, але на це потрібні великі кошти, обладнання, фахівці там

час. Також в Україні спостерігається постійний ріст постраждалих цивільних громадян від ВВП, чого не повинно бути взагалі.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Немає визначених єдиних найкращих рішень в сфері розмінування, але поєднання різних технологій може бути успішнішим, ніж будь-яка з них по одній. У сучасних системах використовується комп'ютерний зір та машинне навчання, після цього вся інформація аналізується за допомогою штучного інтелекту [3]. Таким чином, маємо можливість знайти потрібний нам об'єкт та визначити його - швидко, безпечно, ефективно та економічно вигідно. Але такий підхід є лише одним з етапів і ефективно дозволяє проводити саме планування та підготовку до розмінування. Сучасні безпілотні літальні апарати з мульти-сенсорними платформами надають широкий спектр можливостей для розмінування [4]. Використання таких технічних засобів дозволяє здійснювати збір і аналіз даних в реальному часі, зменшуючи ризик для людей та підвищуючи ефективність операцій. БПЛА оснащені різноманітними сенсорами, які спрямовані на виявлення ВВП та інших потенційно небезпечних об'єктів на землі. Комбінація різних типів сенсорів дозволяє забезпечити більш точне та надійне виявлення об'єктів і зменшити ймовірність помилок.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є аналіз сучасних сенсорних технологій для пошуку та ідентифікації ВВП та розроблення рекомендацій щодо їх можливого сумісного використання в безпілотних системах розмінування. В цій роботі наведено класифікації сенсорів, вибухонебезпечних предметів та деякі їх ознаки для того, щоб розробити план для ефективного використання БПЛА [5]. Метод досліджень, який був обраний, базується на таблицях (матрицях) відповідності сенсорів, ВВП, БПЛА, тощо з її (відповідності) експертною оцінкою. Дослідження базується на публікаціях і класифікаторах статей, опублікованих на кафедрі, а також публікаціях в журналах і технічних матеріалах відповідних компаній та науковців. Структура роботи за розділами є наступною:

- 1) Розроблення класифікатора сенсорів, ВВП, БПЛА на підставі обґрунтованих ознак;
- 2) Створення таблиць покриття "сенсори-ВВП", "ВВП-ознаки", "БПЛА-сенсори" та ін.;
- 3) Аналіз варіантів планування розмінування з використанням БПЛА та сенсорів;
- 4) Висновки та напрями подальших досліджень.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

#### Основні класифікації та таблиці покриття

В роботі формуємо такі дані про сенсори, ВВП для побудови таблиць покриття:

#### Типи сенсорів-детекторів:

Анени (радіохвилі)

- Магнетрон
- Магнітний спектрометр
- Грунтовий радар проникнення (GPR)
- Рентгенівський зворотний розсіювач
- Акустичний (ультразвук)
- Електрична імпедансна томографія
- Інфрачервоні сенсори
- Термальні сенсори
- Датчики вибухових парів
- Візуальні сенсори
- Лідар

#### Типи ВВП та їх ознаки:

Металеві компоненти

- Пластикові компоненти
- Хімічні речовини
- Вибухові пари
- Теплові ознаки
- Інфрачервоні ознаки
- Візуальні ознаки

Акустичні ознакиПроведемо побудову відповідних таблиць. Таблиця 1 описує покриття "сенсори-детектори" — "ВВП". В цій таблиці і далі надано експертну оцінку за шкалою: Н - high високий

рівень визначення детектування сенсором ВНП, М - medium середній, L - low низький. Якщо сенсор не детектує ВНП за відповідною ознакою, ставиться “ - ”.

Таблиця 1

**"Сенсори-детектори" — "ВНП"**

Сенсор-детектор	Металеві компон.	Пластикові компон.	Хімічні речовини	Вибухові пари	Теплові ознаки	Інфрачерв. ознаки	Візуал. ознаки	Акустичні ознаки
Анени (радіохвилі)	Н	L	L	-	-	-	-	-
Магнетрон	Н	L	L	-	-	-	-	-
Магнітний спектрометр	Н	L	L	-	-	-	-	-
Грунтовий радар проникнення (GPR)	Н	М	L	-	-	-	-	-
Рентгенівський зворотний розсіювач	Н	Н	Н	-	-	-	-	-
Акустичний (ультразвук)	М	М	L	-	-	-	-	Н
Електрична імпедансна томографія	М	М	L	-	-	-	-	-
Інфрачервоні сенсори	М	М	L	-	-	Н	-	-
Термальні сенсори	М	М	L	-	Н	-	-	-
Датчики вибухових парів	L	L	М	Н	-	-	-	-
Візуальні сенсори	L	L	L	-	-	-	Н	-
Лідар	L	L	L	-	-	-	Н	-

Вибір сенсорів для використання в БПЛА є критичним етапом для забезпечення ефективного виявлення вибухонебезпечних предметів. Кожен тип сенсора має свої особливості та переваги, що дозволяє використовувати їх у різних умовах та для різних завдань [6]. У деяких випадках може бути доцільним використання комбінації кількох сенсорів для підвищення ефективності та надійності виявлення.

Таблиця 2 описує покриття "ВНП-ознаки" де Н (High): Високий рівень детектування. Це означає, що сенсор або метод дуже ефективний у виявленні ВНП за цією ознакою. М (Medium): Середній рівень детектування. Це означає, що сенсор або метод має помірну ефективність у виявленні ВНП за цією ознакою. L (Low): Низький рівень детектування. Це означає, що сенсор або метод має низьку ефективність у виявленні ВНП за цією ознакою.):

Таблиця 2

**"ВНП-ознаки"**

ВНП	Металеві компон.	Пластикові компон.	Хім. речовини	Вибухові пари	Теплові ознаки	Інфрачерв. ознаки	Візуал. ознаки	Акустичні ознаки
Протитанкові міни	Н	М	М	L	М	L	М	L
Противіхотні міни	М	Н	М	L	L	М	Н	М
Невибухлі боеприпаси (НВБ)	Н	L	М	L	М	L	М	М
Імпровізовані вибухові пристрої	М	Н	Н	М	L	М	Н	L
Залишки касетних	Н	М	М	L	М	L	М	М

боєприпасів								
Ручні гранати	Н	L	М	L	М	L	М	L
Артилерійські снаряди	Н	L	М	L	М	L	М	L
Морські міни	Н	М	М	L	Н	L	М	М
Вибухові речовини у контейн.	М	М	Н	М	L	М	Н	L
Міни-пастки	М	Н	М	М	L	М	Н	L

Вибухонебезпечні предмети (ВНП) є серйозною загрозою для військових та цивільних осіб. Їх виявлення та знешкодження потребує глибокого розуміння їхніх фізичних та хімічних ознак. Таблиця "ВНП-ознаки" надає огляд основних ознак різних типів ВНП, що дозволяє ефективніше їх виявляти та класифікувати.

Дрони можуть використовувати різні типи сенсорів та технологій для виявлення вибухонебезпечних предметів, включаючи мінні пристрої. Ось кілька способів, якими дрони можуть розпізнавати мінні пристрої:

1. **Інфрачервона тепловізія:** Багато мінних пристроїв можуть мати відмінну теплову сигнатуру, особливо якщо вони знаходяться на поверхні землі тривалий час. Дрони, обладнані інфрачервоними камерами, можуть виявляти ці зміни теплового випромінювання та сигналізувати про можливе місцезнаходження мін.

2. **Детектори металу:** Багато мінних пристроїв містять металеві компоненти, які можна виявити за допомогою детекторів металу, встановлених на дронах. Ці детектори можуть реагувати на наявність металу в ґрунті та попереджати оператора про потенційно небезпечні області.

3. **Обробка зображень та машинне навчання:** Дрони також можуть використовувати сучасні алгоритми обробки зображень та машинного навчання для автоматичного виявлення мінних пристроїв на основі візуальних характеристик, таких як форма і колір [7].

Висота, на якій дрон повинен летіти, залежить від типу використовуваних сенсорів та умов на місцевості. Зазвичай дрони можуть літати на висоті від кількох метрів до декількох десятків метрів для ефективного виявлення мінних пристроїв. Щодо реальних прикладів, існують кілька дослідницьких проектів і програм, які тестували застосування дронів для розмінування. Наприклад, Збройні сили різних країн, таких як США (MQ-8C Fire Scout) і Велика Британія, проводили експериментальні випробування дронів з різними сенсорами для виявлення і усунення вибухонебезпечних предметів. Крім того, існують дослідницькі проекти і стартапи, такі як Mine Kafon Drone, які розробляють спеціалізовані дрони для розмінування та виявлення вибухонебезпечних предметів в зонах конфлікту.



рис. 1. MQ-8C Fire Scout



рис. 2. Mine Kafon Drone

Важливо визначити які сенсори ми можемо використовувати вбудованими на борту БПЛА, а які треба розміщувати на ньому окремо, або не просто окремо, а з використанням спеціальних засобів. Від цих даних залежать методи та схеми використання БПЛА для розмінування територій.

Поділ БПЛА на легкі, середні та важкі зазвичай ґрунтується на їхній вазі, вантажопідйомності та призначенні [8-11]. Опрацювавши стандарти деяких країн та наукові роботи бачимо, що вже існує загальна класифікація, яка використовується в цій галузі:

- Легкі БПЛА (Micro/Mini UAVs):  
 Вага: до 25 кг. Вантажопідйомність: до 5 кг. Застосування: переважно для короткострокових місій, таких як розвідка, спостереження та рекогносціювання на невеликій відстані. Приклади: DJI Phantom, Parrot Anafi.
  - Середні БПЛА (Tactical UAVs):  
 Вага: 25-150 кг. Вантажопідйомність: до 25 кг. Застосування: середньострокові місії з більшим радіусом дії, такі як тактична розвідка та картографування. Приклади: AeroVironment Puma, Boeing Insitu ScanEagle.
  - Важкі БПЛА (MALE/HALE UAVs - Medium/High Altitude Long Endurance UAVs):  
 Вага: понад 150 кг. Вантажопідйомність: понад 25 кг. Застосування: довгострокові місії з високим радіусом дії, такі як стратегічна розвідка, моніторинг великих територій та військові операції. Приклади: General Atomics MQ-9 Reaper, Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk.
- На основі наведених даних побудуємо порівняльну таблицю з “Класифікація БПЛА”:

**Таблиця 3**  
**“Класифікація БПЛА”**

Хар-ка	Легкі БПЛА (Micro/Mini UAVs)	Середні БПЛА (Tactical UAVs)	Важкі БПЛА (MALE/HALE UAVs)
Вага	до 25 кг	25-150 кг	понад 150 кг
Вантажопідйомність	до 5 кг	до 25 кг	понад 25 кг
Застосування	Короткострокові місії: розвідка, спостереження, рекогносціювання на невеликій відстані	Середньострокові місії: тактична розвідка, картографування	Довгострокові місії: стратегічна розвідка, моніторинг великих територій, військові операції
Приклади	DJI Phantom, Parrot Anafi	AeroVironment Puma, Boeing Insitu ScanEagle	General Atomics MQ-9 Reaper, Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk

Основним аспектом закріплення сенсорів є механічна фіксація, яка забезпечує стабільність під час польоту. Для цього використовуються різноманітні кріплення, такі як болтові з'єднання, клейові технології або конструкційні елементи, виготовлені з легких матеріалів, що зменшують загальну масу БПЛА. Вибір методу закріплення залежить від типу сенсора, його призначення та умов експлуатації. Наприклад, вібро- і термостійкі кріплення можуть застосовуватись для сенсорів, чутливих до механічних або температурних впливів. Електричне підключення сенсорів також є важливим елементом їхньої інтеграції. Для забезпечення стабільної роботи сенсорів необхідно використовувати якісні кабельні з'єднання, які повинні бути захищені від впливу зовнішнього середовища, вібрацій та електромагнітних завад. Використання гнучких кабелів або бездротових технологій зв'язку може суттєво полегшити процес інтеграції, проте вимагає додаткових заходів для забезпечення надійності з'єднань. Отже, закріплення сенсорів на борту БПЛА вимагає комплексного підходу, що об'єднує механічні, електричні та програмні рішення, які сприяють досягненню максимальної точності та надійності в умовах експлуатації.

Побудуємо таблицю в якій надано результати аналізу стосовно того, як можемо кріпити різні сенсори на БПЛА.

Ця таблиця відображає можливості розміщення різних сенсорів на різних типах БПЛА з урахуванням їхньої ваги та вантажопідйомності. Класифікація БПЛА на легкі, середні та важкі, заснована на їхній вазі та вантажопідйомності, зараз є загальноприйнятою в науковій та інженерній спільноті. Вона часто використовується в наукових статтях, технічних звітах, стандартах та урядових документах, як і зазначено раніше.

Отже, робимо висновки, що кожен тип БПЛА має свої переваги та недоліки залежно від завдань. Легкі БПЛА найкраще підходять для швидкого розгортання і короткострокових місій на малих відстанях. Середні БПЛА забезпечують баланс між тривалістю польоту і вантажопідйомністю, що робить їх ідеальними для тактичних операцій. Важкі БПЛА мають найвищу вантажопідйомність і тривалість польоту, що робить їх незамінними для стратегічних і довгострокових місій, використання багатьох комбінацій сенсорів одночасно. Сучасні технології дозволяють збільшувати тривалість польоту, вантажопідйомність і автономність БПЛА. Це створює нові можливості для їх застосування в різних галузях.

Таблиця 4

"БПЛА-сенсори"

Сенсор	Легкі БПЛА	Середні БПЛА	Важкі БПЛА	Додаткові засоби для розміщення
Анени (радіохвилі)	+	+	+	Немає необхідності
Магнетрон	-	-	+	Спеціальні кріплення
Магнітний спектрометр	-	+	+	Спеціальні кріплення
Грунтовий проникний радар	-	+	+	Спеціальні кріплення
Рентгенівський зворотний розсів	-	+	+	Спеціальні кріплення
Акустичні (ультразвук)	+	+	+	Немає необхідності
Томографія електричного імпедансу	-	+	+	Спеціальні кріплення
Інфрачервоні	+	+	+	Немає необхідності
Термальні	+	+	+	Немає необхідності
Детекція вибухових пар	+	+	+	Спеціальні кріплення
Візуальна детекція	+	+	+	Немає необхідності
Лідар	-	+	+	Спеціальні кріплення

**Планування для розмінування з використанням БПЛА та сенсорів**

У зв'язку з різноманітністю умов та завдань розмінування, необхідно розглянути різні схеми використання БПЛА та сенсорів для максимальної ефективності операцій [12].

- Один БПЛА - один сенсор, який змінюється. Ця схема може бути ефективною в умовах, де потрібно здійснювати детальний моніторинг конкретних ділянок з використанням різних типів сенсорів. Наприклад, для виявлення металевих предметів може використовуватися магнетрон, а для виявлення хімічних речовин - детектор вибухових парів.

- Один БПЛА - кілька сенсорів, які теж можуть змінюватися. Ця схема дозволяє покрити більшу територію та забезпечити більш широкий спектр функцій. БПЛА може бути оснащений декількома сенсорами різного типу, які можуть змінюватися в залежності від потреб місцевої ситуації. Наприклад, може використовуватися комбінація теплових та інфрачервоних сенсорів для виявлення об'єктів різної природи.

- Кілька БПЛА з одним сенсором. Ця схема може бути ефективною в умовах, коли потрібно швидко покрити велику територію та провести загальний огляд ситуації. Кілька БПЛА можуть бути обладнані однаковими сенсорами для одночасного сканування різних ділянок.

- Кілька БПЛА з кількома сенсорами. Ця схема надає найбільшу гнучкість та можливості для розмінування в різних умовах. Кілька БПЛА можуть бути оснащені різними сенсорами, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз об'єктів на землі та зменшує час, необхідний для проведення операцій. Так буде виглядати гістограма на рисунку 3 з відносною експертною оцінкою по 5-ти бальній шкалі:

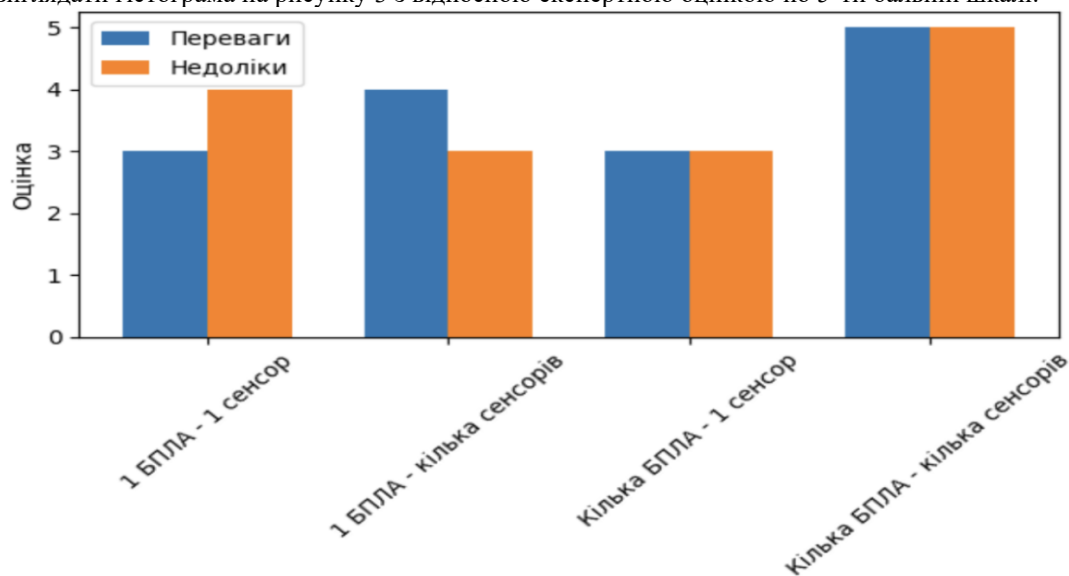


Рис. 3. Гістограма "Переваги і недоліки різних схем використання БПЛА"

Також існують інші можливі підходи, які можуть бути використані для максимальної ефективності операцій розмінування. Деякі з цих схем вже випробувані або в розробці:

1. Автономне розмінування: Використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для автономного керування БПЛА та аналізу даних з сенсорів. Це дозволяє зменшити втручання людини та збільшити швидкість та ефективність операцій [13].
2. Мережа зв'язаних БПЛА: Використання команди БПЛА, які співпрацюють та обмінюються інформацією, щоб забезпечити широке покриття території та високу точність виявлення ВВП.
3. Інтеграція з ґрунтовими та морськими засобами: Використання БПЛА разом з ґрунтовими роботами або плаваючими дронами для комплексного розмінування територій різних типів [14-15].
4. Гібридні сенсорні системи: Розвиток сенсорних систем, які поєднують у собі різні типи сенсорів для отримання більш повної та точної інформації про об'єкти на землі.
5. Мініатюризація сенсорів: Розроблення та використання малих та легких сенсорів, які можна легко встановлювати на невеликих БПЛА або розміщувати у складних умовах.

Ці схеми використання можуть бути оптимізовані в залежності від конкретних умов, масштабу операцій та доступних ресурсів. Для реалізації цих підходів потрібна подальша дослідницька та розробницька робота.

### **ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

Комплексність проблеми мінного забруднення в Україні:

Проблема мінного забруднення є масштабною та загрозовою для безпеки громадян і економічного розвитку країни. Визначення територій, які потребують розмінування, є першочерговим завданням для забезпечення безпечного середовища серед цивільного населення. Ця робота надасть можливість розробити точний та ефективний план початкового гуманітарного розмінування.

Ефективність використання БПЛА та сенсорів:

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з різними типами сенсорів значно підвищує ефективність і безпеку операцій з розмінування. Комбінація сенсорів, таких як інфрачервоні, термальні, детектори вибухових парів, магнетрони та інші, дозволяє більш точно виявляти вибухонебезпечні предмети. Розвиток технологій та різновидів сенсорів ми маємо використовувати вже зараз, спираючись на велику кількість існуючих наукових досліджень та закордонні практики їх впровадження.

Аналіз можливостей сенсорів:

Сенсори, такі як антени (радіохвилі), магнітний спектрометр, ґрунтовий радар проникнення (GPR), рентгенівський зворотний розсіювач, акустичні (ультразвук), електрична імпедансна томографія, інфрачервоні сенсори, термальні сенсори, датчики вибухових парів, візуальні сенсори, лідар, мають різний рівень ефективності в залежності від типу ВВП. Використання цих сенсорів у комбінації дозволяє максимально знизити ризик помилок, треба ретельно розділяти ВВП на конкретні види.

Класифікація БПЛА та їх можливості:

Легкі, середні та важкі БПЛА мають різні можливості вантажопідйомності та застосування сенсорів. Важкі БПЛА можуть нести більші сенсори або мати тривалий строк польоту, тоді як легкі та середні БПЛА мають обмежені можливості, але все ж можуть бути корисними для певних типів сенсорів в залежності від певного завдання.

#### **Перспективи подальших досліджень**

1. Автономне розмінування. Подальші дослідження можуть зосередитися на розробці алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для автономного керування БПЛА та аналізу даних з сенсорів. Це дозволить зменшити втручання людини та збільшити швидкість та ефективність операцій, зберігаючи життя фахівців з розмінування.
2. Розробка мережі зв'язаних БПЛА. Дослідження можуть включати розробку та випробування команди БПЛА, які співпрацюють та обмінюються інформацією для забезпечення широкого покриття території та високої точності виявлення ВВП. Крім того це дає більш повну картину початкових робіт та визначає саме ефективні методи для пошуку на конкретній забрудненій ділянці.
3. Інтеграція з ґрунтовими та морськими засобами. Перспективним напрямом є дослідження можливостей інтеграції БПЛА з ґрунтовими роботами або плаваючими дронами для комплексного розмінування територій різних типів. Важливо отримати повну карту території разом із водною, яка може бути частиною мінного поля.
4. Розвиток гібридних сенсорних систем. Подальші дослідження можуть зосередитися на розвитку сенсорних систем, які поєднують у собі різні типи сенсорів для отримання більш повної та точної інформації про об'єкти на землі.
5. Мініатюризація сенсорів. Розробка та використання малих та легких сенсорів, які можна легко встановлювати на невеликих БПЛА або розміщувати у складних умовах, є важливим напрямом для

підвищення мобільності та ефективності розмінувальних операцій. Також це дозволяє збільшити автономність польотів.

6. Покращення алгоритмів обробки зображень та даних. Дослідження можуть включати вдосконалення алгоритмів обробки зображень та даних для більш точного виявлення та класифікації ВВП. Це дозволить знизити ймовірність помилкових виявлень та підвищити ефективність операцій з розмінування [16].

7. Тестування та випробування в реальних умовах. Проведення тестування та випробувань розроблених систем у реальних умовах мінного забруднення дозволить оцінити їх ефективність та виявити можливі недоліки, що потребують вдосконалення. Розглянуті різні схеми використання БПЛА та сенсорів, включаючи використання одного БПЛА з одним сенсором, одного БПЛА з кількома сенсорами, кількох БПЛА з одним сенсором та кількох БПЛА з кількома сенсорами. Кожна схема має свої переваги і може бути ефективною в залежності від конкретних умов.

Підсумовуючи, можна сказати, що використання сучасних технологій для розмінування територій в Україні має великий потенціал для підвищення безпеки та економічного розвитку країни. Наразі за допомогою закордонних партнерів наша країна отримує чимало різних приладів для ДСНС та військових підрозділів. Подальші дослідження та впровадження новітніх рішень у цій сфері сприятимуть більш ефективному вирішенню проблеми мінного забруднення та збереженню життя і здоров'я громадян.

### Література

1. Iuliia Osmolovska, Nataliia Bilyk, Ukraine and Eastern Europe Programme. Cleaning the Augean Stables: Humanitarian Demining in Ukraine. Publication 30.01.2024. URL: <https://www.globsec.org/sites/default/files/2024-01/Cleaning%20the%20Augean%20Stables%20Demining%20Ukraine.pdf>.
2. Clearing the mines 2023. Report for Twenty-First Meeting of States Parties to the 1997 Anti-Personnel Mine Ban Convention. November 06, 2023. URL: [https://www.mineactionreview.org/assets/downloads/7721\\_Clearing\\_the\\_Mines\\_2023.pdf](https://www.mineactionreview.org/assets/downloads/7721_Clearing_the_Mines_2023.pdf).
3. Gennadiy Fedorenko, Herman Fesenko, Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Ihor Tolkunov. Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models. Radioelectronic and Computer Systems, 2023, no. 2(106). DOI: 10.32620/reks.2023.2.12.
4. Claudio Bruschini. A Survey of Current Sensor Technology Research for the Detection of Landmines. roceedings of the International Workshop on Sustainable Humanitarian Demining (SusDem'97), 29 Sept.-1 Oct. 1997, Zagreb, Croatia, pp. 6.18/6.27. URL: [https://www.researchgate.net/publication/2611552\\_A\\_Survey\\_of\\_Current\\_Sensor\\_Technology\\_Research\\_for\\_the\\_Detection\\_of\\_Landmines](https://www.researchgate.net/publication/2611552_A_Survey_of_Current_Sensor_Technology_Research_for_the_Detection_of_Landmines).
5. Eulalia Balestrieri, Pasquale Daponte, Luca De Vito and Francesco Lamonaca. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. Article, 22 February 2021. DOI:10.3390/s21041518.
6. Joint Workshop, Italy 2000. Research on Demining Technologies. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA389794.pdf>.
7. Milan Bajić and Božidar Potočnik. UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. This article belongs to the Special Issue Single and Multi-UAS-Based Remote Sensing and Data Fusion. 9 February 2023. DOI: 10.3390/rs15040967.
8. Syed Agha Hassnain Mohsan, Muhammad Asghar Khan, Fazal Noor, Insaf Ullah and Mohammed H. Alsharif. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. This article belongs to the Special Issue Security, Privacy and Reliability of Drone Communications for beyond 5G Networks. 15 June 2022. DOI: 10.3390/drones6060147.
9. M. Hassanalian, A. Abdelkefi. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences Volume 91, May 2017, Pages 99-131. DOI: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
10. Qassim A. Abdullah, Ph.d. CP, PLS, Instructor, MGIS program, The Pennsylvania State University. Classification of the Unmanned Aerial Systems. Lessons from PennState College of Earth and Mineral Sciences. URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>.
11. Olena Tachinina, Vladyslav Kutieпов, Alexander Lysenko. Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. Electronics and control systems. 2022-12-29 Issue Vol. 4 No. 74 2022. DOI: 10.18372/1990-5548.74.17354.
12. Г. Федоренко, Г. Фесенко, В. Харченко. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2022. No. 4(22). DOI: 10.30837/ITSSI.2022.21.020.
13. Chuanyun Wang, Linlin Meng, Qian Gao, Jingjing Wang, Tian Wang, Xiaona Liu, Furui Du, Linlin Wang and Ershen Wang. A Lightweight Uav Swarm Detection Method Integrated Attention Mechanism. Drones 2023, 7, 13. DOI: 10.3390/drones7010013.



14. Dimitrios Chatziparaschis, Michail G. Lagoudakis and Panagiotis Partsinevelos. Aerial and Ground Robot Collaboration for Autonomous Mapping in Search and Rescue Missions. *Drones* 2020, 4(4), 79. DOI: 10.3390/drones4040079.
15. Arif Wibisono, Md. Jalil Piran, Hyoung-Kyu Song and Byung Moo Lee. A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors* 2023, 23(17), 7321. DOI: 10.3390/s23177321.
16. Мельниченко Олександр. Методи збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення заданих об'єктів. Дипломна робота, Хмельницький національний університет, 2023-12-14. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/0c2189fa-85cc-42e2-af28-688d18fdacc6>.

### References

1. Iuliia Osmolovska, Nataliia Bilyk, Ukraine and Eastern Europe Programme. Cleaning the Augean Stables: Humanitarian Demining in Ukraine. Publication 30.01.2024. URL: <https://www.globsec.org/sites/default/files/2024-01/Cleaning%20the%20Augean%20Stables%20Demining%20Ukraine.pdf>.
2. Clearing the mines 2023. Report for Twenty-First Meeting of States Parties to the 1997 Anti-Personnel Mine Ban Convention. November 06, 2023. URL: [https://www.mineactionreview.org/assets/downloads/7721\\_Clearing\\_the\\_Mines\\_2023.pdf](https://www.mineactionreview.org/assets/downloads/7721_Clearing_the_Mines_2023.pdf).
3. Gennadiy Fedorenko, Herman Fesenko, Vyacheslav Kharchenko, Ihor Kliushnikov, Ihor Tolkunov. Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, no. 2(106). DOI: 10.32620/reks.2023.2.12.
4. Claudio Bruschini. A Survey of Current Sensor Technology Research for the Detection of Landmines. *proceedings of the International Workshop on Sustainable Humanitarian Demining (SusDem'97)*, 29 Sept.-1 Oct. 1997, Zagreb, Croatia, pp. 6.18/6.27. URL: [https://www.researchgate.net/publication/2611552\\_A\\_Survey\\_of\\_Current\\_Sensor\\_Technology\\_Research\\_for\\_the\\_Detection\\_of\\_Landmines](https://www.researchgate.net/publication/2611552_A_Survey_of_Current_Sensor_Technology_Research_for_the_Detection_of_Landmines).
5. Eulalia Balestrieri, Pasquale Daponte, Luca De Vito and Francesco Lamonaca. *Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview*. Article, 22 February 2021. DOI:10.3390/s21041518.
6. Joint Workshop, Italy 2000. *Research on Demining Technologies*. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA389794.pdf>.
7. Milan Bajić and Božidar Potočnik. UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. This article belongs to the Special Issue Single and Multi-UAS-Based Remote Sensing and Data Fusion. 9 February 2023. DOI: 10.3390/rs15040967.
8. Syed Agha Hassnain Mohsan, Muhammad Asghar Khan, Fazal Noor, Insaf Ullah and Mohammed H. Alsharif. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. This article belongs to the Special Issue Security, Privacy and Reliability of Drone Communications for beyond 5G Networks. 15 June 2022. DOI: 10.3390/drones6060147.
9. M. Hassanalian, A. Abdelkefi. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences* Volume 91, May 2017, Pages 99-131. DOI: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
10. Qassim A. Abdullah, Ph.d. CP, PLS, Instructor, MGIS program, The Pennsylvania State University. *Classification of the Unmanned Aerial Systems. Lessons from PennState College of Earth and Mineral Sciences*. URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5>.
11. Olena Tachinina, Vladyslav Kutieпов, Alexander Lysenko. Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and control systems*. 2022-12-29 Issue Vol. 4 No. 74 2022. DOI: 10.18372/1990-5548.74.17354.
12. G. Fedorenko, G. Fesenko, V. Kharchenko. Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2022. No. 4(22). DOI: 10.30837/ITSSI.2022.21.020.
13. Chuanyun Wang, Linlin Meng, Qian Gao, Jingjing Wang, Tian Wang, Xiaona Liu, Furui Du, Linlin Wang and Ershen Wang. A Lightweight Uav Swarm Detection Method Integrated Attention Mechanism. *Drones* 2023, 7, 13. DOI: 10.3390/drones7010013.
14. Dimitrios Chatziparaschis, Michail G. Lagoudakis and Panagiotis Partsinevelos. Aerial and Ground Robot Collaboration for Autonomous Mapping in Search and Rescue Missions. *Drones* 2020, 4(4), 79. DOI: 10.3390/drones4040079.
15. Arif Wibisono, Md. Jalil Piran, Hyoung-Kyu Song and Byung Moo Lee. A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors* 2023, 23(17), 7321. DOI: 10.3390/s23177321.
16. Oleksandr Melnychenko. Methods of collecting, recognizing and processing images obtained using UAVs to detect given objects. Graduate work, Khmelnytskyi National University, 2023-12-14. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/0c2189fa-85cc-42e2-af28-688d18fdacc6>.